第41卷 第3期
2024年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 3
Mar. 2024

DOI:10.13866/j.azr.2024.03.09

祁连山典型植被土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征的垂直变化

白丽丽[1]， 王文颖[2,3]， 德却拉姆[2]， 刘艳方[1]， 邓艳芳[4]，

（1. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810008； 2. 青海师范大学生命科学学院，青海 西宁 810008；
3. 青藏高原生物多样性形成机制与综合利用省级重点实验室，青海 西宁 810008；
4. 祁连山国家公园青海服务保障中心，青海 西宁 810008）

摘 要：本研究针对祁连山国家公园山体沿海拔（2700~4043 m）自下而上出现的针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸、流石滩稀疏植被5种典型植被，研究土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比垂直分异规律，为祁连山国家公园生态系统土壤碳氮磷生物地球化学循环过程提供数据参考和科学依据。结果表明：（1）祁连山山体垂直带上0~40 cm土壤总碳、总氮和总磷含量分别为15.33~83.46 $g \cdot kg^{-1}$、1.63~7.76 $g \cdot kg^{-1}$、0.41~0.66 $g \cdot kg^{-1}$。土壤总碳和总氮含量均表现为针叶林>草甸化草原>高寒灌丛>高寒草甸>流石滩稀疏植被，都是沿着海拔的升高显著降低。土壤全磷含量表现为高寒灌丛显著高于高寒草甸，其余植被间差异不显著。（2）0~40 cm土壤铵态氮、硝态氮、速效磷含量分别为11.01~14.73 $mg \cdot kg^{-1}$、2.78~12.46 $mg \cdot kg^{-1}$和4.35~13.57 $mg \cdot kg^{-1}$。土壤铵态氮含量在各植被类型间差异不显著，土壤硝态氮含量沿着海拔的升高而显著降低，土壤速效磷在流石滩稀疏植被中含量较高。（3）0~40 cm土壤C:N、C:P和N:P含量分别为9.52~10.11、29.89~320.24和3.18~29.63，土壤C:N沿着海拔升高逐渐降低，土壤C:P和N:P在流石滩稀疏植被中显著低于其他植被，潜在指示碳和氮是流石滩限制性养分元素，但相对于碳和氮，流石滩是一个富磷的环境。海拔综合多种环境因子变化，显著影响土壤碳、氮、磷的生物化学过程。

关键词：植被类型；海拔；土壤理化性质；生态化学计量；祁连山

土壤作为陆地生态系统极其重要的组成单元，是许多生态过程的载体，在植物生长中发挥着关键作用，直接影响着植物群落的组成、稳定和演替[1]。土壤碳、氮、磷是生态系统最基本的组成元素，也是植物赖以生存的重要环境条件，影响着生态系统生产力和群落结构组成。因此，研究土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征，不仅可以认识碳、氮、磷在生态系统中的循环、平衡机制及其对植物群落结构和功能的影响，还可以揭示碳、氮、磷在生态系统过程中的耦合关系[2]。

海拔作为一种自然地理变化，是影响土壤碳、氮、磷分布的重要因素之一[3]。由于海拔的升高，温度、降水、光照发生连续性变化[4]，从而导致植被沿海拔有规律的分布，并形成明显不同的地上与地下输入，进而导致土壤性质发生显著变化[5]。因此，不同海拔梯度下植被带变化如何影响和改变土壤碳、氮、磷含量和生态化学计量比，一直是生态学研究的热点之一。任玉连等[6]研究发现，热带地区南滚河国家级自然保护区植被类型沿海拔梯度有规律的分布，通过改变土壤理化环境，进而显著影响土壤碳氮的空间分布。张一帆等[7]提出，长白山地不同海拔梯度下植被带变化改变土壤碳、氮、磷含量和生态化学计量比。李丹维等[8]研究表明，秦岭太白山土壤碳、氮含量随海拔升高先增后降，磷含量的空间变异较小。吴昊等[9]研究发现，秦岭松栎林随着海拔的增加，土壤C:N呈现先升后降，N:P先降后升，而C:P则无明显变化。海拔综合了温度、光照、水分等多种环境因子的变化，影响着土壤碳、

收稿日期：2023-08-10； **修订日期：**2023-10-23
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0502）；2021年第一批中央林草生态保护恢复资金自然资源调查监测项目（2021QHXH017）；青海省2021年度第一批中央引导地方科技发展专项资金（2021ZY002）
作者简介：白丽丽（1990-），女，博士研究生，主要从事草地生态学研究. E-mail: Lilysx@163.com
通讯作者：王文颖. E-mail: wangwy0106@163.com

氮、磷的固持和分布格局。

不同气候环境下,土壤碳、氮、磷沿着海拔梯度在各植被类型中的累积过程存在较大差异。深入探讨特定地区土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征对海拔变化的响应,有助于理解区域土壤元素的生物地球化学循环过程及其生态系统功能的维持机制。祁连山国家公园地处青藏、蒙古、黄土三大高原交汇带[10],是西北地区乃至中国重要的生态功能区[11]。其境内生态系统独特,自然景观多样,海拔跨度大,水热梯度显著,垂直山体覆盖针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸、流石滩稀疏植被等典型植被类型。山体垂直带自山顶到低海拔分布区表现出明显的增温效应,恰好是研究气候变化下植被/土壤类型变化与演替的天然平台和理想场地。因此,本研究针对祁连山不同海拔梯度下的典型生态系统(针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸、流石滩稀疏植被)土壤为研究对象,分析不同海拔梯度下土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比的垂直空间变化规律,阐明山体垂直带土壤理化性质与土壤碳氮磷生态化学计量比之间相关性的空间格局,为进一步揭示祁连山国家公园气候变化背景下生态系统土壤碳氮磷生物地球化学循环过程提供数据参考和科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山国家公园青海片区仙米林场—冷龙岭,海拔介于2700~4500 m(图1)。该区地处东部季风、西北干旱、青藏高寒的交汇区,东南季风从东向西由强变弱,属高原大陆性气候。太阳辐射强,日夜温差较大,冷季长,暖季短,干湿分明,气温和降水垂直变化明显,雨热同季。年均气温在4 ℃以下,极端最高气温为37.6 ℃,极端最低气温为−35.8 ℃;年均日照时数为2500~3300 h,太阳总辐射量为5916~15000 MJ·m^{-2},平均降水量400 mm,蒸发量1137~2581 mm,平均风速2 m·s^{-1}左右,无霜期23.6~193 d。该地区复杂的地形地貌以及变化多样的生境条件,使区域范围内海拔自下而上发育形成了针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被5类显著差异的植物类型,土壤类型也表现出相应明显的垂直带谱,依次发育了山地灰褐土、亚高山草甸土、高山灌丛草甸土、高山草甸土和高山寒漠土。

1.2 样地设置及样品的采集

选择祁连山垂直带典型植被,针叶林(2700 m)、草甸化草原(3278 m)、高寒灌丛(3555 m)、高寒草甸(3720 m)和高山流石滩(4043 m)作为研究样地(样地基本情况详见表1)。2020年将每类样地用20 m×20 m网围栏圈设保护,以便长期监测。2021年8月中旬晴朗的天气连续两天进行土壤样品采集,采样期间无降雨。采集土壤样品时,分别将每类样地均等划分为4个10 m×10 m样方,每个样方内随机布设3个采样点,每个采样点利用环刀和不锈钢土钻采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm的4层

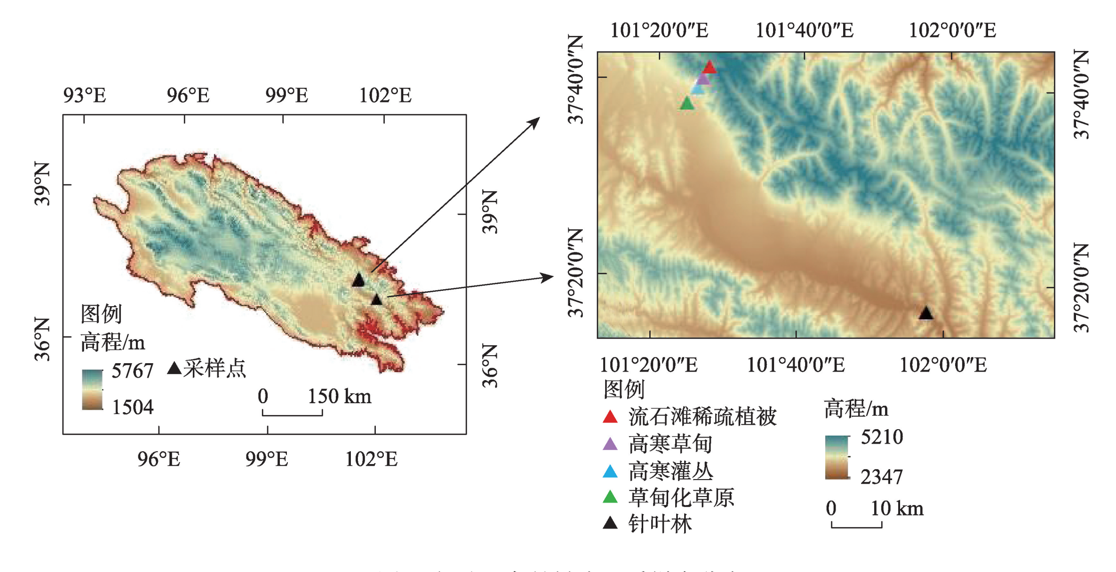


图1 祁连山各植被类型采样点分布

Fig. 1 Dtribution of sampling sites across different vegetation types in Qilian Mountains

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of sampling points

植被类型(土壤类型)	地理位置	海拔/m	植被盖度/%	优势种
针叶林(山地灰褐土)	37°17′25″N, 101°57′29″E	2700	80	青海云杉+早熟禾 *Picea crassifolia*+*Poa annua*
草甸化草原(亚高山草甸土)	37°37′42″N, 101°24′11″E	3278	95	珠芽蓼+鹅绒委陵菜+高山嵩草 *Bistorta vivipara*+*Potentilla anserina*+*Kobresia pygmaea*
高寒灌丛(高山灌丛草土)	37°39′17″N, 101°25′38″E	3555	95	金露梅+鬼箭锦鸡儿+矮嵩草 *Potentilla fruticosa*+*Caragana jubata*+*Kobresia humilis*
高寒草甸(高山草甸土)	37°40′19″N, 101°26′13″E	3720	70	高山嵩草+早熟禾 *Kobresia pygmaea*+*Poa annua*
流石滩稀疏植被(高山寒漠土)	37°41′30″N, 101°27′06″E	4043	40	胎生鳞茎早熟禾+高山嵩草+囊肿草 *Poa bulbosa* L. var. *vivipara* Koeler+*Kobresia pygmaea*+*Thylacospermum caespitosum*

土样。原状环刀样带回实验室用于测定土壤容重和含水量。同一样方内同一层次的土钻样充分混匀后,装入密封袋带回实验室用于测定土壤其他属性。由于高山流石滩稀疏植被下土体极薄,仅取到0~10 cm的土壤,之下为斜长角岩、片麻岩、石英角闪岩、基性火山岩等多种类型的碎石。

1.3 样品的处理及测定

土壤容重测定采用环刀法,土壤含水量测定采用烘干法[12]。土壤混合样经过室内风干、去杂质后,研磨过孔径2 mm网筛,采用电位法测定pH(土:水=1:2.5),总碳和总氮含量采用元素分析仪(Elementar)测定,全磷(H_2SO_4:$HClO_3$=3:1消煮),铵态氮和硝态氮(0.5 mol·L^{-1} K_2SO_4溶液浸提)、速效磷(0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$溶液浸提)采用连续流动分析仪(FUTURA,Alliance Instruments,Frépillon,France)测定[13]。

1.4 数据分析

使用Microsoft Excel 2016进行数据处理,IBM Statistics SPSS 20.0进行方差分析(海拔和土层采用two-way ANOVA,相同土层不同植被间采用one-way ANOVA)、多重比较(LSD),用Sigmaplot 14.0绘图。Pearson法对不同样点的土壤理化性质和生态化学计量比进行相关分析,用Origin 2017绘图。

2 结果与分析

2.1 沿海拔梯度各植被类型的土壤质量含水量、容重和pH分布特征

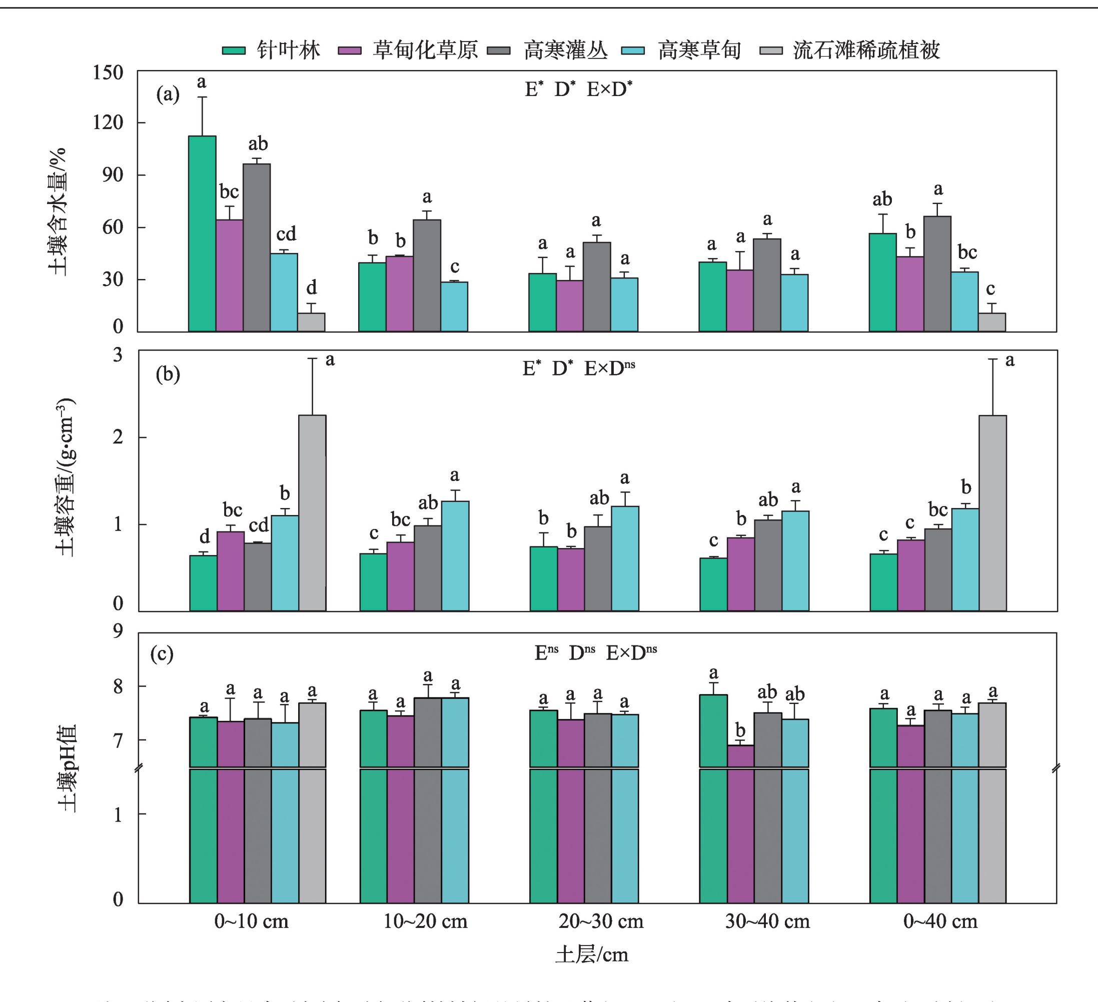
祁连山青海片区沿山体垂直带不同植被类型土壤含水量、容重和pH变化特征见图2。针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤平均含水量分别为56.46%、43.12%、66.39%、34.36%和10.70%。其中,0~10 cm针叶林和高寒灌丛土壤含水量显著高于草甸化草原、高寒草甸和流石滩稀疏植被,10~20 cm高寒灌丛土壤含水量显著高于其他植被类型土壤含水量,深层土壤(20~40 cm)含水量不同植被类型间无显著差异。另外,各植被类型下土壤含水量均呈现随土壤深度增加而递减。

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤平均容重分别为0.66 g·cm^{-3}、0.82 g·cm^{-3}、0.95 g·cm^{-3}、1.18 g·cm^{-3}和2.25 g·cm^{-3}。不同植被类型之间,土壤容重随着海拔升高,从针叶林到流石滩稀疏植被大致呈现逐渐增大的变化趋势。

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被土壤pH介于7.27~7.69,不同植被类型之间、同一植被类型下不同土壤层间,差异多不显著。

2.2 沿海拔梯度各植被类型的土壤总碳、总氮、全磷分布特征

祁连山青海片区沿山体垂直带不同植被类型土壤总碳、总氮、全磷含量变化特征见图3。针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤平均总碳含量分别为83.46 g·kg^{-1}、64.92 g·kg^{-1}、63.57 g·kg^{-1}、40.41 g·kg^{-1}和15.33 g·kg^{-1},土壤全碳含量随海拔增高逐步降低。0~10 cm层土壤总碳含量,高寒灌丛、针叶林、草甸化草原显著高于高寒草甸和流石滩稀疏植被,且高寒草甸土壤总碳显著高于流石滩稀疏植被。10~20 cm土壤总碳含量,针叶林和草原化草甸显著高于高寒草甸。20~30 cm和30~40 cm土壤总碳含量,针叶林显著高于草原化草甸和高寒灌丛,后两者显著高于高寒草甸。各植被类型下,土壤总碳含量随着土壤深度增加均呈现下降趋势。



注：不同小写字母表示相同土层不同植被间差异性显著（P<0.05）。E表示海拔（m）；D表示土层（cm）；*表示差异显著（P<0.05）；ns表示差异不显著（P>0.05）。下同。

图2　沿山体垂直带不同植被类型下土壤含水量、容重和pH分布特征

Fig. 2　Elevational soil moisture contents, densities and pH values at 0−40 cm depth among five vegetation types

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤平均总氮含量分别为7.76 g·kg^{-1}、6.35 g·kg^{-1}、5.85 g·kg^{-1}、4.25 g·kg^{-1}和1.63 g·kg^{-1}。土壤总氮含量随海拔增高逐步下降。各植被类型下，随土壤深度增加，土壤总氮含量逐渐下降。各土壤层总氮含量在不同植被类型间差异显著性与总碳基本一致，也表现为0~10 cm层土壤总氮含量，高寒灌丛、针叶林、草甸化草原显著高于高寒草甸和流石滩稀疏植被，且高寒草甸土壤总氮显著高于流石滩稀疏植被。10~20 cm土壤总氮含量，针叶林和草原化草甸显著高于高寒草甸。20~30 cm和30~40 cm土壤总碳含量，针叶林显著高于草原化草甸和高寒灌丛，后两者显著高于高寒草甸。

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤平均全磷含量分别为0.53 g·kg^{-1}、0.54 g·kg^{-1}、0.66 g·kg^{-1}、0.41 g·kg^{-1}和0.55 g·kg^{-1}，土壤全磷含量随海拔增高在高寒灌丛达到最大值，然后逐渐下降。各植被类型下，0~10 cm和10~20 cm土壤全磷含量变化不大，随着土壤深度增加土壤全磷含量逐渐降低。

2.3 沿海拔梯度各植被类型的土壤铵态氮、硝态氮、速效磷含量分布特征

祁连山青海片区沿山体垂直带不同植被类型土壤铵态氮、硝态氮和速效磷含量变化特征见图4。针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤铵态氮平均含量分别为12.28 mg·kg^{-1}、12.54mg·kg^{-1}、11.56 mg·kg^{-1}、11.01 mg·kg^{-1}和14.73 mg·kg^{-1}。不同植被间同一土层的土壤铵态氮含量差异不显著。0~10 cm高寒草甸土壤铵态氮含量最高，10~20 cm和20~30 cm均为草甸化草原土壤铵态氮含量最高，30~40 cm针叶林和高寒灌丛土壤铵态氮含量略高于草甸化草原和

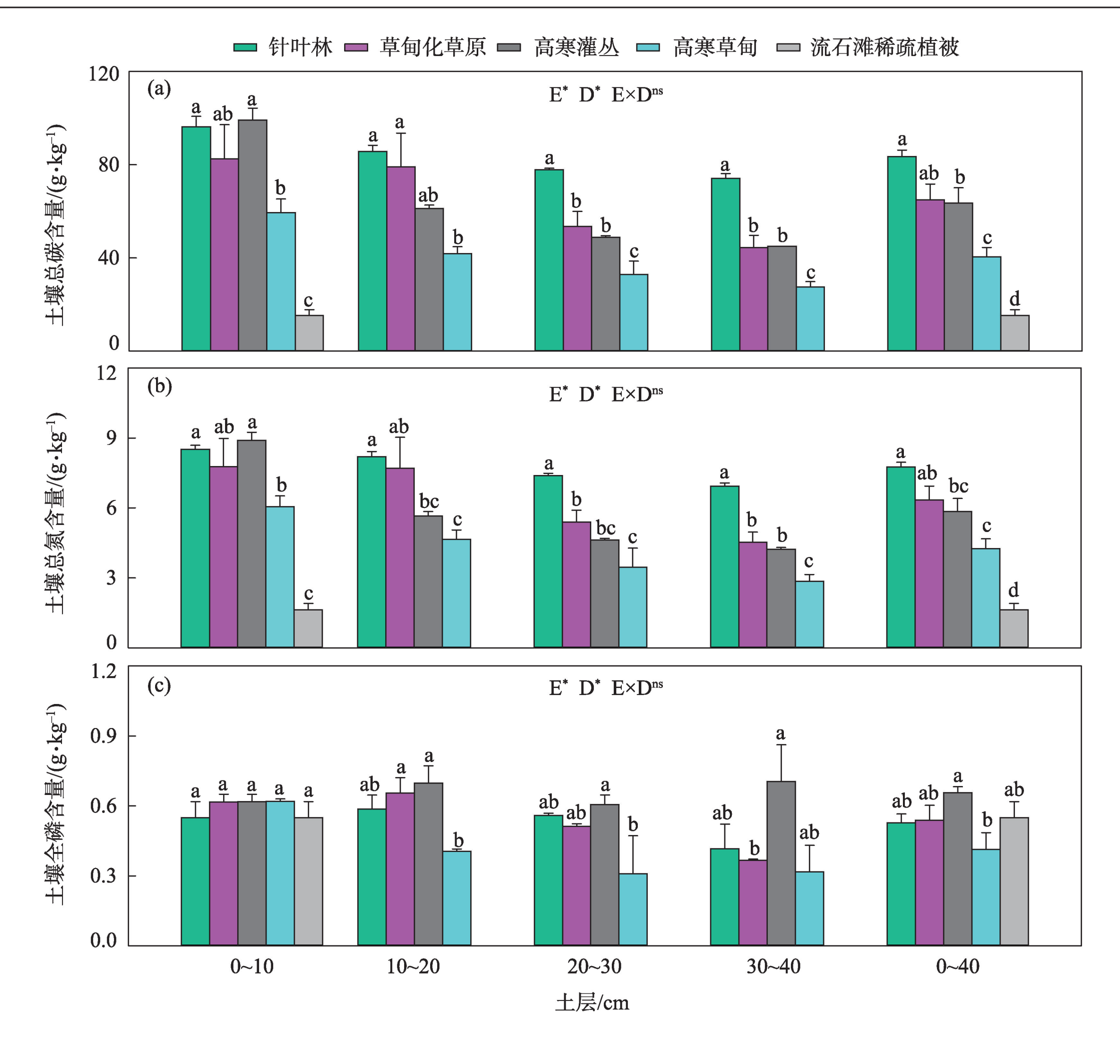


图3 沿山体垂直带不同植被类型下土壤总碳、总氮、全磷含量分布特征

Fig. 3 Elevational soil total C、N and P contents at 0−40 cm depth among five vegetation types

高寒草甸，但差异不显著。

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤硝态氮平均含量分别为12.46 mg·kg^{-1}、10.39 mg·kg^{-1}、5.83 mg·kg^{-1}、5.36 mg·kg^{-1}和2.78 mg·kg^{-1}。土壤硝态氮含量随海拔增高而降低。各土壤层中，0~10 cm和10~20 cm土壤硝态氮含量均呈现随海拔增高而逐渐降低，针叶林和草甸化草原土壤硝态氮含量显著高于高寒灌丛和高寒草甸。20~30 cm高寒灌丛土壤硝态氮含量显著低于其他植被，30~40 cm针叶林土壤硝态氮含量高于其他植被，其他植被间差异不显著。

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤速效磷平均含量分别为5.2 mg·kg^{-1}、4.96 mg·kg^{-1}、4.35 mg·kg^{-1}、5.06 mg·kg^{-1}和13.57 mg·kg^{-1}。流石滩稀疏植被土壤速效磷含量显著高于其他植被，各土壤层中，0~10 cm土壤速效磷含量显著高于其他土壤层。10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm高寒灌丛土壤速效磷含量均为最低。

2.4 沿海拔梯度各植被类型的土壤生态化学计量比分布特征

祁连山青海片区沿山体垂直带不同植被类型土壤C:N、C:P和N:P变化特征见图5。针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤C:N平均分别为10.74、10.11、10.8、9.57和9.52。总体上针叶林、草原化草甸和高寒灌丛C:N高于高寒草甸和流石滩稀疏植被。植被类型间土壤C:N变异较小。针叶林、草甸化草原、高寒灌丛0~10 cm土壤C:N显著高于高寒草甸和流石滩稀疏植被，高寒草甸和流石滩稀疏植被间差异不显著。针叶林和高寒灌丛10~20 cm和30~40 cm土壤层C:N显著高于草甸化草原和高寒草甸，20~30 cm土壤C:N不同植被间差异不显著。

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤C:P平均分别为176.80、

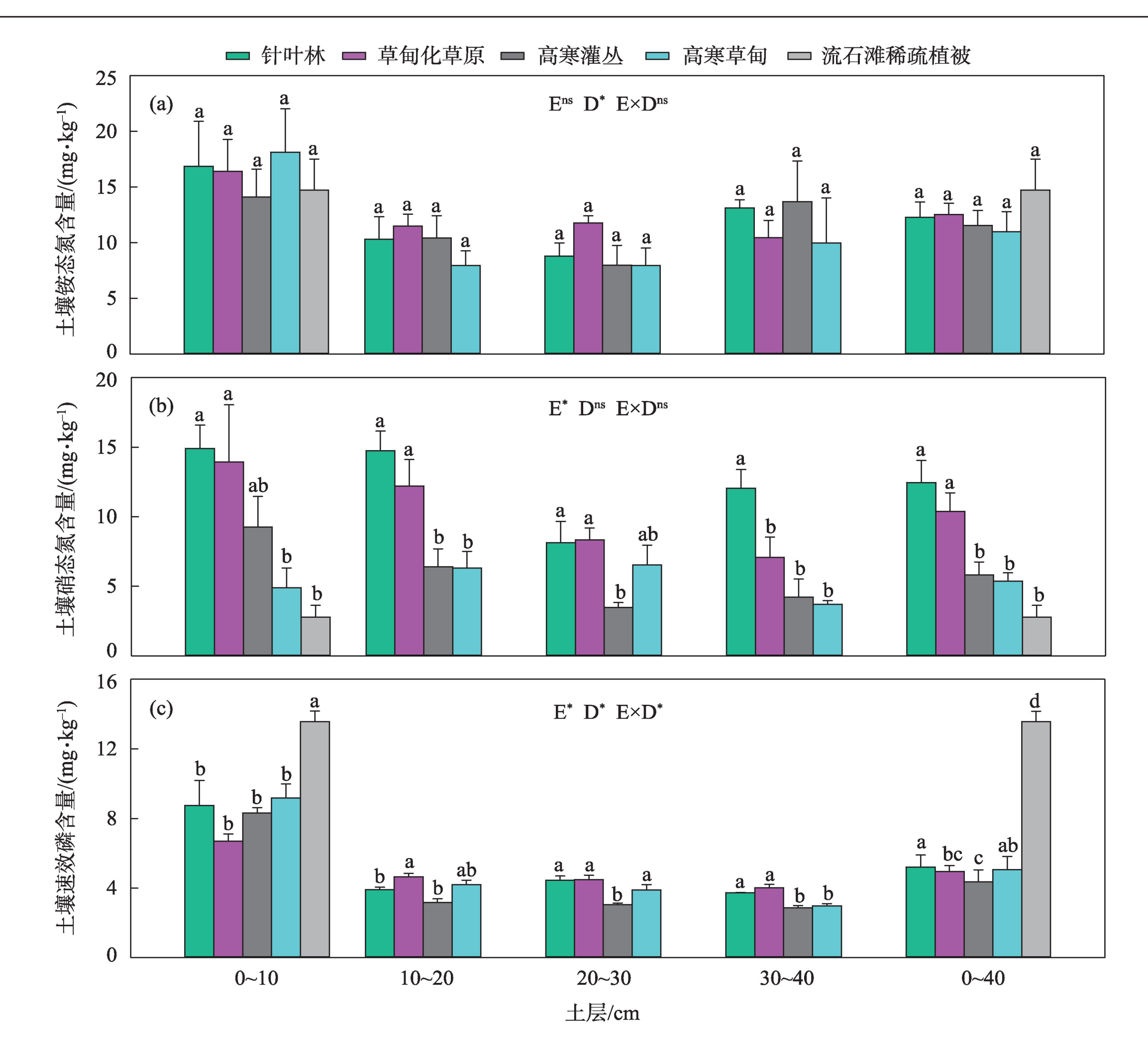


图4 沿山体垂直带不同植被类型下土壤铵态氮、硝态氮和速效磷含量分布特征

Fig. 4 Elevational soil NH_4^+-N, NO_3^--N and available phosphorus contents at 0-40 cm depth among five vegetation types

119.82、95.69、124.77和29.89。针叶林、草原化草甸和高寒草甸土壤C:P较高,高寒灌丛和流石滩稀疏植被较低。针叶林0~10 cm土壤C:P显著高于其他植被类型,草原化草甸、高寒灌丛和高寒草甸植被间差异不显著,但显著高于流石滩稀疏植被。10~20 cm土壤C:P针叶林显著高于高寒灌丛和高寒草甸,20~30 cm和30~40 cm土壤C:P高寒灌丛均最低。

针叶林、草甸化草原、高寒灌丛、高寒草甸和流石滩稀疏植被0~40 cm土壤N:P平均分别为16.33、11.79、8.09、12.85和3.18。总体上和C:P相似,针叶林、草原化草甸和高寒草甸土壤N:P较高,高寒灌丛和流石滩稀疏植被较低。流石滩稀疏植被0~10 cm土壤N:P显著低于其他植被,10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm土壤C:P高寒灌丛均最低。

2.5 土壤理化性质与生态化学计量比的相关性分析

土壤理化性质与生态化学计量比的相关性分析见图6。土壤含水量与土壤容重显著负相关,与总碳、总氮、C:N、C:P和N:P显著正相关,土壤容重与总碳、总氮、硝态氮和C:N显著负相关,与速效磷显著正相关,总碳与总氮、硝态氮、C:N、C:P和N:P显著正相关。总氮与硝态氮、C:N、C:P和N:P显著正相关。全磷与C:P和N:P显著负相关,铵态氮与硝态氮、速效磷、C:P和N:P显著正相关,硝态氮与C:N显著正相关,C:P与N:P显著正相关。

3 讨 论

3.1 土壤基本理化性质

土壤物理性质决定着土壤水、肥、气、热等状况,影响着植被类型的发生、发育和演替的速度[10]。土壤水分是土壤系统元素运移及循环的载体,直接影响土壤的特性和植物的生长。研究表明,土壤含水量受降水[14]、土壤温度[10]、土壤性质、土层深度、地

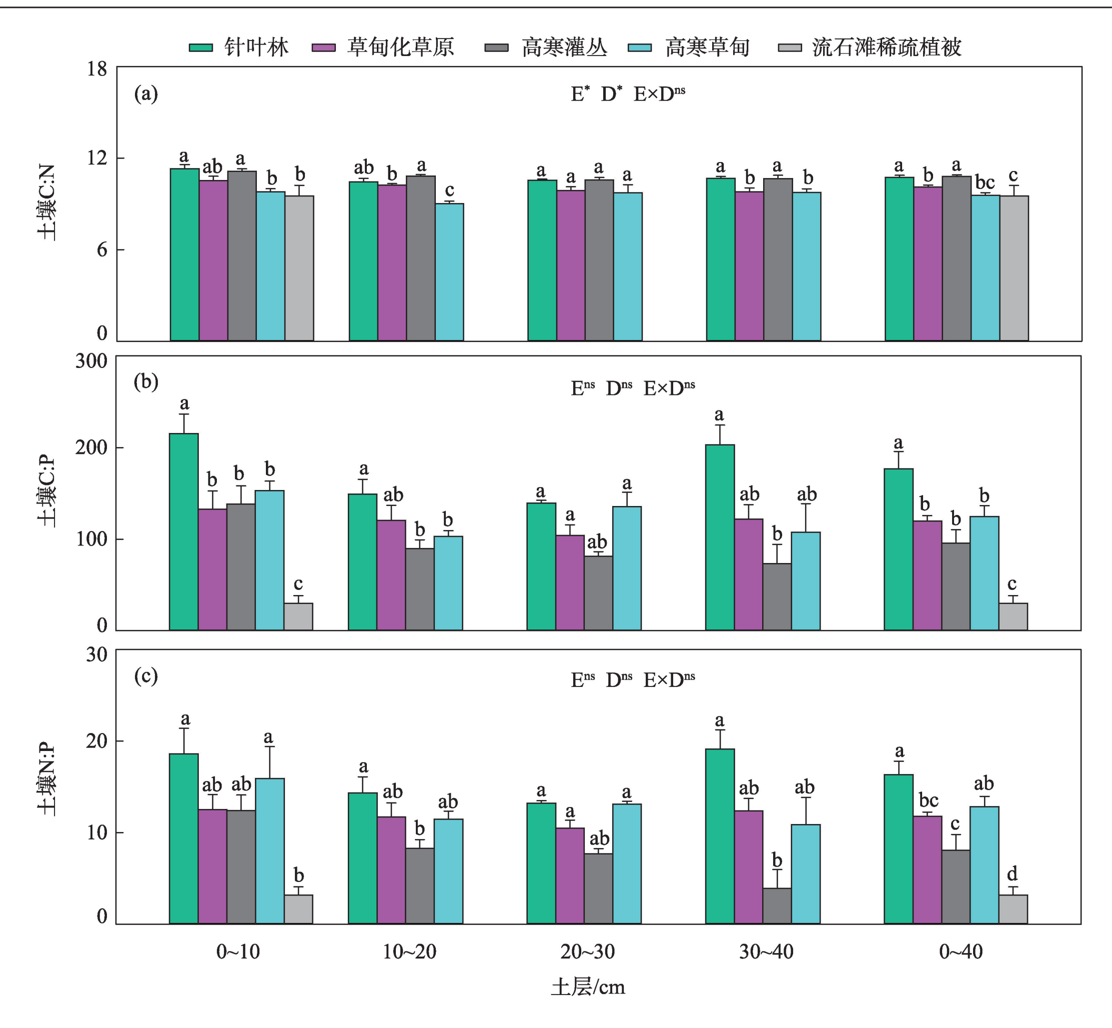
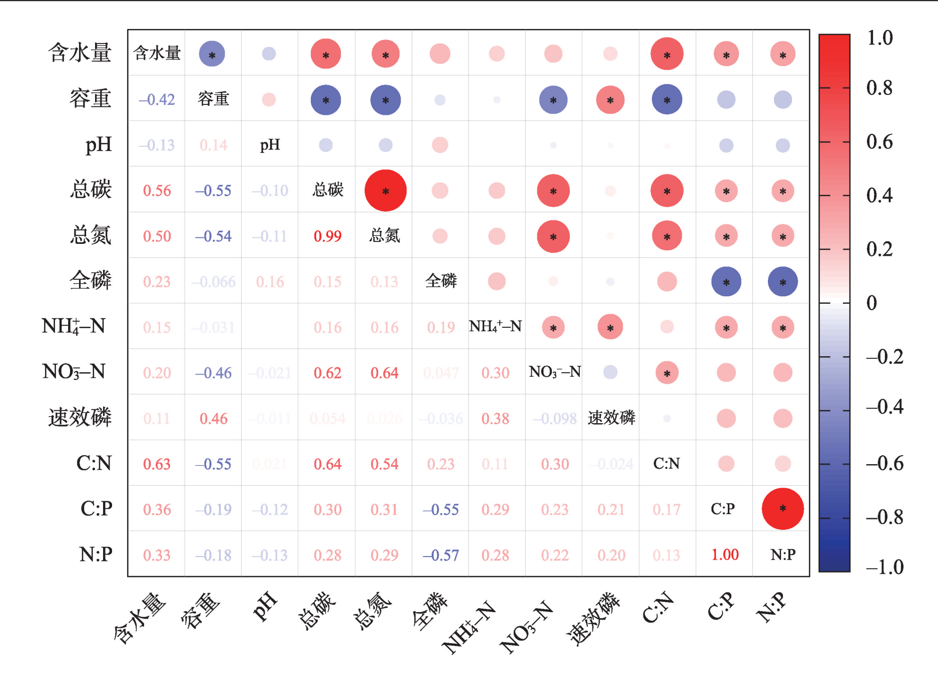


图5 沿山体垂直带不同植被类型下土壤生态化学计量比分布特征

Fig. 5 Elevational soil ecological stoichiometry ratios at 0−40 cm depth among five vegetation types

表植被、海拔等[15]多种因素影响。本研究中，祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型的土壤含水量变化较大(10.70%~66.39%)，主要受地表植被类型和土层深度影响。针叶林和高寒灌丛在0~10 cm和10~20 cm土层中土壤质量含水量较高，高山流石滩稀疏植被0~10 cm土壤含水量较低。20~40 cm土壤质量含水量各植被间无显著差异。相关性分析表明，土壤含水量与土壤总碳、总氮、C:N、C:P、N:P显著正相关。即随着土壤含水量的减少，土壤碳、氮含量及C:N、C:P、N:P计量比均有不同程度的减少，说明土壤含水量是影响祁连山青海片区生态系统中土壤碳、氮含量及化学计量比的一项重要环境因子。土壤含水量通过影响土壤养分的累积，进而影响土壤化学计量比。土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标，影响着植物根系生长和凋落物分解，进而影响元素在土壤生态过程的运移和积累[16]。土壤容重越小，土壤疏松多孔，团粒结构较好；相反，土壤容重越大，土壤紧实板硬，缺乏团粒结构[17]。已有研究表明，正常土壤的容重约为1.30 g·cm^{-3}，当土壤容重达到1.50 g·cm^{-3}时，植物根系很难伸入土壤[18]。本研究中，祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型的土壤容重范围为0.66~2.25 g·cm^{-3}。针叶林(0.66 g·cm^{-3})、草甸化草原(0.82 g·cm^{-3})、高寒灌丛(0.95 g·cm^{-3})和高寒草甸(1.18 g·cm^{-3})土壤容重在正常范围，土壤疏松程度和团粒结构良好。随着海拔的升高，受植被、土壤发育等多种因素影响，高山流石滩稀疏植被(2.25g·cm^{-3})，土壤容重偏大且已超过植物根系穿插土壤的临界值，土壤紧实板硬。土壤容重与土壤总碳、总氮、硝态氮、C:N显著负相关，土壤容重小则土壤疏松，有利于碳、氮元素在土壤中累积；土壤容重大则土壤紧实，不宜于植物根系生长且减少凋落物分解，从而影响土壤中碳、氮元素含量。土壤pH是影响土壤养分有效性及供肥能力的重要因素[19]，祁连山青海片区沿山体



注:*表示差异显著(P<0.05)。

图6　土壤理化性质和生态化学计量比的相关性分析

Fig. 6　Pearson correlation of soil physiochemical properties and ecological stoichiometric ratios

垂直带5种典型植被类型的pH值变化范围为7.27~7.69,差异不显著。在土壤的垂直剖面上,各植被间pH变化较小。

3.2　土壤碳、氮、磷含量特征

土壤作为生态系统中生物与环境相互作用的基质,贮存着大量的碳、氮、磷等元素[20-21]。碳是植物结构性元素[22],氮、磷是植物生长必需矿质营养元素,也是生态系统常见的限制性元素[20]。土壤碳、氮、磷常作为衡量土壤肥力的重要指标,对植物的生长至关重要,直接影响植被类型的组成,决定生态系统的结构和功能[23]。由于环境因子差异,不同海拔梯度下生态系统土壤碳、氮、磷的空间异质性,塑造山地生态系统的复杂性和异质性[24]。本研究区,祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型的土壤总碳、总氮含量变化范围为15.33~83.46 g·kg^{-1}和1.63~7.76 g·kg^{-1},空间变异性较大,由于海拔引起区域内光照、热量和水分等因素在地理空间上的变化,进而导致植被类群改变,显著影响了土壤总碳和总氮含量在空间上的分布格局,这与大多数人的研究结果一致[25]。土壤总碳、总氮含量在不同植被类型间均显示针叶林>草甸化草原>高寒灌丛>高寒草甸>流石滩稀疏植被,沿着海拔的升高逐渐降低。析其因,一方面,随着海拔的升高,土壤温度降低,植被类型由针叶林向流石坡稀疏植被过渡,植被繁茂程度降低,导致了各植被带的生物量和性质发生变化;另一方面,低海拔地区气温高,降雨多,生物化学循环作用强烈。相关性分析表明,土壤总碳与总氮之间呈现显著正相关,土壤中的大部分的氮元素以有机氮的形式存在于有机质中,因此有机质含量越高,土壤中氮素含量也越高,这与郁国梁等[26]在天山中段南坡巴伦台地区天然草场研究结果一致,表明土壤碳、氮元素之间具有较强的耦合关系。

在不同层次土壤间,土壤总碳和总氮含量随着土层深度的增加而逐渐减小,呈现明显的"表聚"现象,这与胡亚伟在晋西黄土区土地利用方式对土壤理化性质的影响研究结论一致[27]。0~10 cm土壤中,针叶林和高寒灌丛中的枯落物相对较多且易分解,流石滩较少,故针叶林和高寒灌丛总碳和总氮含量较高,流石坡最低。随着土层的加深,受植物根系分解、土壤微生物等因素影响,土壤总碳和总氮含量呈现针叶林>草甸化草原>高寒灌丛>高寒草甸。祁连山青海片区沿山体垂直带5种植被类型中的土壤全磷含量变化范围为0.41~0.66 g·kg^{-1},远低于全球土壤平均磷含量2.8 g·kg^{-1}[11],这与杨学亭等[10]发现祁连山不同类型草地土壤磷较缺乏的研究结论

一致。磷受成土母质的影响，主要来源于岩石风化，且迁移率低，属于沉积性元素[28]。本研究区土壤磷含量在空间上变异小且相对稳定。在不同层次土壤中，各植被间0~10 cm土壤全磷含量差异不显著，但10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm土层间高寒灌丛土壤全磷含量均较高，高寒草甸均最低，这说明植被类型是影响该研究区深层土壤全磷含量差异的主要原因。

铵态氮和硝态氮是土壤中两种重要的有效氮，可被植物直接吸收利用，其含量的多少直接影响地上植被的生长策略、群落组成及潜在生产力[29]。祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型的土壤铵态氮（11.01~14.73 $mg\cdot kg^{-1}$，平均12.42 $mg\cdot kg^{-1}$）显著高于硝态氮含量（2.78~12.46 $mg\cdot kg^{-1}$，平均7.36 $mg\cdot kg^{-1}$），表明铵态氮是祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型中的无机氮的主要存在形式，这与刘攀[13]发现的三江源地区高寒草甸铵态氮土壤无机氮中主要形式的结论一致。在祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型中的土壤铵态氮含量呈现流石滩稀疏植被（14.73 $mg\cdot kg^{-1}$）>草甸化草原（12.54 $mg\cdot kg^{-1}$）>针叶林（12.28 $mg\cdot kg^{-1}$）>高寒灌丛（11.56 $mg\cdot kg^{-1}$）>高寒草甸（11.01 $mg\cdot kg^{-1}$），硝态氮含量呈现针叶林（12.46 $mg\cdot kg^{-1}$）和草甸化草原（10.39 $mg\cdot kg^{-1}$）显著高于其他植被，高寒灌丛（5.83 $mg\cdot kg^{-1}$）、高寒草甸（5.36 $mg\cdot kg^{-1}$）和流石滩稀疏植被（2.78 $mg\cdot kg^{-1}$）硝态氮含量较低，可能随着海拔的升高，冻融现象频繁，使硝态氮在土壤中容易流失。土壤磷受成土母质岩石分化影响[30]，流石滩稀疏植被冻融交替频繁，岩石分化较严重，土壤中速效磷含量较高。祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型中0~10 cm土壤速效磷含量显著高于其他层次，析其因，主要受地上植被枯枝落叶分解和岩石分化影响，表层土壤速效磷含量提高。相关性分析中，铵态氮与土壤速效磷显著正相关，流石滩稀疏植被中铵态氮含量和速效磷含量均较高。

3.3 土壤碳、氮、磷化学计量比特征

土壤生态化学计量可以反映土壤内部元素循环状况，研究海拔梯度上土壤养分化学计量特征的空间分布格局，有助于明确山地生态系统的土壤养分限制状况，揭示其潜在的影响因素[31]。由于环境因子差异，不同海拔梯度下的土壤碳、氮、磷含量差异较大，从而使土壤C:N、C:P和N:P存在较大的空间变异性。本研究发现，祁连山青海片区沿山体垂直带5种典型植被类型的土壤生态化学计量比在地理空间尺度上呈现，土壤C:N保持相对稳定，而C:P、N:P的变异性较大。有研究表明，C:N大小与有机质在矿化过程中所释放出有效氮的多少成反比，C:N值越大，释放出有效氮量就越少。当土壤C:N>25（基于质量）时，有机质积累比分解更快，土壤C:N在12~16之间时，有机质被微生物很好地分解[32]。本研究区土壤C:N在9.52~10.80均低于全国平均值（11.9）[33]，总氮与C:N显著正相关，土壤有机质分解作用和有效氮释放潜力较大。

土壤C:P被认为是有机磷矿化能力的象征，有研究表明，C:P>300表明有机磷净固定，C:P在200~300之间意味着可溶性磷几乎没有变化，C:P<200时，意味着有机磷净矿化[34]。此外，土壤C:P与有机质分解过程所释放的有效磷含量呈反比，C:P越小，有机质分解过程中释放有效磷的潜力越大[35]。本研究中，各植被类型间C:P平均值的范围为29.89~176.80，存在较大的空间变异性。针叶林（176.80）、草原化草甸（119.82）、高寒草甸（124.77）显著大于我国土壤C:P平均值（105）[36]，且有机磷净矿化度高；高寒灌丛（95.69）和流石滩稀疏植被（29.89）C:P小于我国平均值，在一定程度上可以指示高寒灌丛和流石滩稀疏植被中土壤碳和磷的生物有效性较高，土壤微生物在矿化土壤有机质中有较大的潜力释放磷素。此研究结论与马剑等[11]发现的祁连山5种典型灌丛土壤磷为净矿化的结论一致，土壤磷的有效性较高，有利于灌丛植被的生长。

土壤N:P可以反映养分库容量和氮磷的矿化速率，从而间接预测植被养分的供给和限制水平。本研究区中，针叶林（16.33）、草甸化草原（11.79）、高寒灌丛（8.09）、高寒草甸（12.85）比值均高于全国水平（8）[37]，但流石滩稀疏植被（3.18）低于全国N:P平均值，说明氮是流石滩稀疏植被的限制性营养元素，但磷的有效性较高。

相关性分析，C:P与N:P显著正相关，高寒灌丛和流石滩稀疏植被的C:P和N:P在植被间均最低；总碳与C:P和N:P显著正相关，针叶林总碳含量、C:P和N:P在植被间均呈现最高；全磷与C:P和N:P显著负相关，高寒灌丛全磷含量较高，C:P和N:P较低，说明土壤的碳、氮、磷含量及化学计量特征与植被类型密切相关，土壤性质随植被类型变化积极响应。

4 结 论

海拔梯度和土壤深度显著影响土壤碳、氮、磷含量及碳氮化学计量比。土壤总碳、总氮含量沿着海拔的升高逐渐降低,并呈现“表聚”现象。土壤全磷含量偏低,变异小且相对稳定,但速效磷含量海拔和土层主效应和交互效应显著。生态化学计量比呈现,土壤C:N海拔和土层主效应显著,土壤C:P和N:P在流石滩稀疏植被中显著低于其他植被,潜在指示碳氮是流石滩限制性营养元素,但相对于碳氮,流石滩是一个富磷的环境。

参考文献(References):

[1] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6303-6313. [Sheng Maoyin, Liu Yang, Xiong Kangning. Responses of soil physicochemical properties to karst rocky desertification in southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6303-6313.]

[2] 吴丹, 温晨, 卫伟, 等. 黄土高原小流域不同植物群落土壤生态化学计量的垂直变化特征[J]. 广西植物, 2022, 7(7): 1-16. [Wu Dan, Wen Chen, Wei Wei, et al. Soil ecological stoichiometry of different plant communities in a small watershed on the Loess Plateau[J]. Guihaia, 2022, 7(7): 1-16.]

[3] Zhang Y Q, Ai J J, Sun Q W, et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by vegetation types and altitude across the mountainous regions in the Yunnan Province, south-western China[J]. Catena, 2021, 196: 104872.

[4] Bin H, Li Q, Zhang P, et al. effects of Elevation on ecological stoichiometry of plant leaves, litter, and soils in pseudotsuga sinensis forest in the Karst Mountain region, Southwest China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(6): 3582-3597.

[5] Njeru C M, Ekesi S, Mohamed S A, et al. Assessing stock and thresholds detection of soil organic carbon and nitrogen along an altitude gradient in an east Africa mountains ecosystem[J]. Geoderma Regional, 2017, 10: 29-38.

[6] 任玉连, 陆梅, 曹乾斌, 等. 南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104-115. [Ren Yulian, Lu Mei, Cao Qianbin, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen reserves of typical vegetation types in Nantumhe National Nature Reserve[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(11): 104-115.]

[7] 张一帆, 武海涛, 刘吉平, 等. 长白山地土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量垂直特征[J]. 环境生态学, 2023, 5(1): 75-81. [Zhang Yifan, Wu Haitao, Liu Jiping, et al. Vertical characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus content and ecological stoichiometry in Changbai Mountains[J]. Environmental Ecology, 2023, 5(1): 75-81.]

[8] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 160-170. [Li Danwei, Wang Ziquan, Tian Haixia, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and ecological stoichiometric characteristics at different elevations in Taibai Mountains[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 160-170.]

[9] 吴昊, 邹梦茹, 王思芊, 等. 秦岭松栎林土壤生态化学计量特征及其对海拔梯度的响应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2323-2331. [Wu Hao, Zou Mengru, Wang Siqian, et al. Soil ecological stoichiometric characteristics of pine oak forest and its response to elevation gradient in Qinling Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(12): 2323-2331.]

[10] 杨学亭, 樊军, 盖佳敏, 等. 祁连山不同类型草地的土壤理化性质与植被特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(4): 878-886. [Yang Xueting, Fan Jun, Gai Jiamin, et al. Soil physicochemical properties and vegetation characteristics of different grassland types in the Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(4): 878-886.]

[11] 马剑, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山5种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1391-1400. [Ma Jian, Liu Xiande, Jin Ming, et al. Soil ecological stoichiometry of five typical shrubs in Qilian Mountains[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(8): 1391-1400.]

[12] 江胜国. 国内土壤容重测定方法综述[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(2): 82-86. [Jiang Shengguo. Review of soil bulk density measurement methods in China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(2): 82-86.]

[13] 刘攀. 尿素配施脲酶/硝化抑制剂对三江源区退化高寒草甸氮转化的影响及作用机理研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2021. [Liu Pan. Influences of Urea Combined with Urease/Nitrification Inhibitor on Nitrogen Transformation and Its Mechanism Research of Degraded Alpine Meadow in the Source Region of Three Rivers [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2021.]

[14] 杨阳, 章妮, 陈克龙, 等. 青海湖高寒草地土壤理化性质及微生物群落特征对模拟降水的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(5): 1043-1052. [Yang Yang, Zhang Ni, Chen Kelong, et al. Responses of soil physicochemical properties and microbial community characteristics to simulated precipitation in Alpine grassland of Qinghai Lake, China[J]. Acta Grassland Sinica, 2021, 29(5): 1043-1052.]

[15] 刘西刚, 王勇辉, 焦黎. 夏尔希里自然保护区草地表层土壤理化性质与海拔高度的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 773-780. [Liu Xigang, Wang Yonghui, Jiao Li. Relationship between physical and chemical properties of grassland surface soil and altitude in Xiarhili Nature Reserve[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 773-780.]

[16] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量

特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345-1355. [Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. Stoichiometric characteristics of oasis soil in the northern margin of Tarim Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1345-1355.]

[17] 平翠枝, 红梅, 王文东, 等. 不同耕作方式对黑土区农田土壤物理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(7): 83-89. [Ping Cuizhi, Hong Mei, Wang Wendong, et al. Effects of different tillage methods on soil physical properties in black soil area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(7): 83-89.]

[18] 李晓英, 周惠民, 李畅, 等. 城市不同功能区绿地土壤理化性质及微生物生物量的分布特征[J]. 土壤, 2021, 53(4): 874-880. [Li Xiaoying, Zhou Huimin, Li Chang, et al. Distribution characteristics of soil physical and chemical properties and microbial biomass in urban greenbelt with different functional areas[J]. Soils, 2021, 53(4): 874-880.]

[19] 张剑, 宿力, 王利平, 等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589. [Zhang Jian, Su Li, Wang Liping, et al. Effects of vegetation coverage on ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus: A case study of Yangguan Wetland, Dunhuang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 580-589.]

[20] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947. [Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.]

[21] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153-163. [Zhao Qiong, Zeng Dehui. Phosphorus cycle and its influencing factors in terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(1): 153-163.]

[22] 刘倩, 王书丽, 邓邦良, 等. 武功山山地草甸不同海拔凋落物-土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1535-1541. [Liu Qian, Wang Shuli, Deng Bangliang, et al. Contents of litter-soil carbon, nitrogen and phosphorus at different elevations and their ecological stoichiometric characteristics in Wugong Mountains meadow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1535-1541.]

[23] 姚喜喜, 宫旭胤, 白滨, 等. 祁连山高寒牧区不同类型草地植被特征与土壤养分及其相关性研究[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 371-379. [Yao Xixi, Gong Xuyin, Bai Bin, et al. Study on the relationship between vegetation characteristics and Soil nutrients of different grassland types in Alpine pastoral areas of Qilian Mountains[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 371-379.]

[24] 邓小军, 朱柳霏, 宋贤冲, 等. 猫儿山自然保护区不同林分类型土壤生态化学计量特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 366-373. [Deng Xiaojun, Zhu Liufei, Song Xianchong, et al. Soil ecological stoichiometry of different forest types in Mao'er Mountain Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 366-373.]

[25] 高海宁, 李彩霞, 孙小妹, 等. 祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 219-227. [Gao Haining, Li Caixia, Sun Xiaomei, et al. Soil stoichiometric characteristics at different elevations in the northern foot of Qilian Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 219-227.]

[26] 郁国梁, 马紫荆, 吕自立, 等. 海拔和植物群落共同调节天山中段南坡巴伦台地区天然草场土壤化学计量特征[J]. 草业学报, 2023, 32(9): 68-78. [Yu Guoliang, Ma Zijing, Lyu Zili, et al. Altitude and plant community jointly regulate soil stoichiometry characteristics of natural grassland in the Baluntai area on the southern slope of the middle Tianshan Mountains, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(9): 68-78.]

[27] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 等. 晋西黄土区土地利用方式对土壤C: N: P化学计量特征及土壤理化性质的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 990-999. [Hu Yawei, Sun Ruoxiu, Shen Mingshuang, et al. Effects of land use on soil C:N:P stoichiometry and soil physical and chemical properties in the Loess region of Western Shanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 990-999.]

[28] Cheng M, An S S. Response of soil nitrogen, phosphorus and organic matter to vegetation succession on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(2): 216-223.

[29] 阎欣, 安慧, 刘任涛. 荒漠草原沙漠化对土壤物理和化学特性的影响[J]. 土壤, 2019, 51(5): 1006-1012. [Yan Xin, An Hui, Liu Rentao. Effects of desertification on soil physical and chemical properties in desert steppe[J]. Soils, 2019, 51(5): 1006-1012.]

[30] 肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 994-1001. [Xiao Ye, Shang Lina, Huang Zhigang, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their ecological stoichiometry characteristics in mountainous marshes of eastern Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(8): 994-1001.]

[31] 牟文博, 徐当会, 王谢军, 等. 排露沟流域不同海拔灌丛土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2022, 46(11): 1422-1431. [Mou Wenbo, Xu Danghui, Wang Xiejun, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry along an altitude gradient in shrublands in Pailugou watershed, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(11): 1422-1431.]

[32] 杨羽, 夏品华, 林陶, 等. 贵州草海湿地不同水位梯度土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比分布特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 164-172. [Yang Yu, Xia Pinhua, Lin Tao, et al. Soil C, N, P contents and their ecological stoichiometric ratios at different water level gradients in Caohai wetland, Guizhou Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(1): 164-172.]

[33] 刘永万, 白炜, 尹鹏松, 等. 外源氮素添加对长江源区高寒沼泽草甸土壤养分及植物群落生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 483-491. [Liu Yongwan, Bai Wei, Yin Pengsong, et al. Effects of exogenous nitrogen addition on soil nutrients and plant community biomass of Alpine marsh meadow in the source region of the

Yangtze River[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 483−491.]

[34] Paul Eldor A. Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry[M]. London: Academic Press, 2006: 189−203.

[35] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1872−1878. [Peng Peiqin, Zhang Wenju, Tong Chengli, et al. Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wet-lands of Dongting Lake flood plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1872−1878.]

[36] 刘颖, 宫渊波, 李瑶, 等. 川西高寒灌丛草地不同海拔梯度土壤化学计量特征[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(2): 167−174. [Liu Ying, Gong Yuanbo, Li Yao, et al. Soil stoichiometry characteristics of alpine shrub grassland at different elevation gradients in western Sichuan[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, 36(2): 167−174.]

[37] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratio in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1−3): 139−151.

Elevational variations in ecological soil C, N, and P stoichiometry among five typical vegetation types in the Qilian Mountains

BAI Lili[1], WANG Wenying[2,3], Dequelamu[2], LIU Yanfang[1], DENG Yanfang[4]

(1. College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghia, China; 2. College of Life Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghia, China; 3. Provincial Key Laboratory of Biodiversity Formation Mechanism and Comprehensive Utilization in Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810008, Qinghai, China; 4. Qinghai Service and Guarantee Center of Qilian Mountains National Park, Xining 810008, Qinghia, China)

Abstract: Five typical vegetation types (i.e., coniferous forests, meadow grasslands, alpine shrubs, alpine meadows, and sparse vegetations of limestone flat) along a vertical belt of the Qilian Mountains were selected to explore the spatial elevational patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus and their stoichiometric ratios. Results showed that: (1) The contents of total carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) at the 0−40 cm depth were 15.33−83.46, 1.63−7.76, and 0.41−0.66 mg·kg^{-1}, respectively. Soil C and N decreased gradually with increasing altitudes, following the order coniferous forests>meadow steppes>alpine shrubs>alpine meadows>sparse vegetations of limestone flat. Soil P in alpine scrubs was significantly higher than that in alpine meadows, but the other three vegetations showed no significant difference. (2) The contents of NH_4^+-N, NO_3^--N and available phosphorus at the 0−40 cm depth were 11.01−14.73, 2.78−12.46, and 4.35−13.57 mg·kg^{-1}, respectively. Ammonium was the main inorganic nitrogen form in all vegetation types. The nitrite content decreased gradually with increasing altitude. The content of soil available phosphorus was higher in sparse vegetations of limestone flats. (3) The ratios of soil C:N, C:P, and N:P at the 0−40 cm depth were 9.52−10.11, 29.89−320.24, and 3.18−29.63, respectively. Soil C:N decreased with elevation. Soil C:P and N:P were significantly lower in the soil of sparse vegetations of the limestone flat than in other vegetations, indicating that carbon and nitrogen were the limiting nutrients in the limestone flat. By contrast, the limestone flat was in a phosphorus-rich state. Elevational variations in soil C, N, and P contents and their stoichiometric ratios reflect the joint control of multiple environmental factors, thereby affecting the biochemical processes of soil C, N, and P.

Keywords: vegetation type; elevations; soil physicochemical properties; eco-stoichiometry; Qilian Mountains